

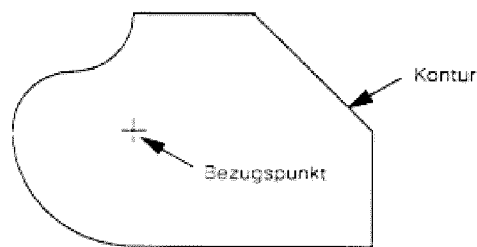


Manual teaching method relative to end effector.**Publication number:** EP0671246**Publication date:** 1995-09-13**Inventor:** LIEPERT BERND DIPL-MATH (DE); SCHMIDT WOLFGANG DR (DE); OLOMSKI JUERGEN DR (DE); SEEGER GUIDO DR (DE)**Applicant:** SIEMENS AG (DE)**Classification:****- international:** **G05B19/425; G05B19/425;** (IPC1-7): B25J9/16; G05B19/425**- European:** G05B19/425**Application number:** EP19950103349 19950308**Priority number(s):** DE19944407924 19940309**Also published as:** EP0671246 (A3)**Cited documents:** EP0440816[Report a data error here](#)**Abstract of EP0671246**

The rotation point always lies at the origin of a base coordinate system during changes in orientation. The workpiece can be gripped as for subsequent machining and manually moved so that characteristic points are moved above the fixed workpiece, whereby the orientation is learnt. The programmer can specify the nature of the connections between points. The base coordinate system can be fixed within the tool. The position of the gripper coordinate system is determined in relation to the base coordinate system and hence to the tool.

**FIG 1**

Data supplied from the **esp@cenet** database - Worldwide



Description of EP0671246

Print

Copy

Contact Us

Close

Result Page

Notice: This translation is produced by an automated process; it is intended only to make the technical content of the original document sufficiently clear in the target language. This service is not a replacement for professional translation services. The esp@cenet® Terms and Conditions of use are also applicable to the use of the translation tool and the results derived therefrom.

With the numerically steered treatment of workpieces by one machine, a more obvious advantage is that it can bring a robot crucial technological advantages, if in relation to the conventional treatment with that the tool is led by the robot hand across a stationary workpiece, the tool is stationarily attached and the workpiece by the robot hand across the stationary tool led. For the latter mode of handling by robotic control a so-called grip arm-referred interpolation is made, against what with the conventional guidance of the tool over a stationary workpiece basis-referred one interpolates.

The grip arm-referred interpolation brings several advantages to the user, and. A. the structure more simply, one necessarily only a grip arm and saves the clamping device for the workpiece, a stationary tool is subject to fewer restrictions in weight and dimensions and the supply installations for filler rod, cooling agent become clearly simpler, since they do not have to be supplied by way of the bionic arms. Secondly one obtains shorter cycle times, since one brings the workpiece in a processing step without stopping and embracing, to work on and again remove can.

Task of the invention is to be facilitated it with the grip arm-referred interpolation the Teachin with led workpiece. In addition a variant of the cartesisschen hand procedure is needed, with the translation and rotation to the stationary tool to refer. In particular the tool, which is selected as origin of the basis coordinate system, must be the fixed point of all turns.

This task is solved by the characteristics of the patent claims.

A remark example of the invention is more near described in the following on the basis the design. Show:

FIG 1 to FIG 4 illustration of the grip arm-referred interpolation,
FIG 5 the guidance of a tool over a stationary workpiece, attached at a robot hand,
FIG 6 the guidance of a Werkstücks over a stationary tool, attached at a robot hand,
FIG 7 learning the course with led tools,
FIG 8 learning the course also firmly stretched workpiece,
FIG 9 the cartesian hand procedure with turns around the axes of the basic system,
FIG 10a to FIG 10c grip arm-referred hand procedure modes in the comparison.

Before with the grip arm-referred hand procedure one deals, first the problem of the grip arm-referred interpolation is illustrated on the basis the figures 1 to 4.

▲ top The question, how the robot hand must change, if one leads not the tool but the workpiece, but the same relative motion between both liked to receive extracts itself very fast to the imaginative power. By a simple two-dimensional example, as it is represented on the basis the figures 1 to 4, some fundamental peculiarities can be made clear well. FIG 1 shows a workpiece, whose outline is compound from straight pieces and circle sections. If one stretches this workpiece firmly, then the drawn outline corresponds to the course of the tool tip. If the tool is rotationally symmetric, the outline with a pure translation movement can be driven off.

An arranged tool must always keep against it a certain orientation to the outline. The change of orientation is clarified on the basis FIG 2 by the small arrows attacking at the outline. If one determines the tool and if the workpiece moves, these two cases show very different effects to the movement of the robot hand. Into FIG 3 the workpiece of the robot hand in the point of reference (= grab point) is reached and the movement of this point is regarded, which is necessary, in order to lead the outline at the being certain workpiece along.

With rotationally symmetric tools the orientation of the workpiece, always only the contact between outline and tool can be maintained is to be guaranteed. The resulting movement results then simply from reflection of the workpiece outline in the center of the connecting line between point of reference and tool. In this case one can be converted grip arm-referred programmed course obviously very simply. One must reflect only all bases of the course and can succession and length of the course segments invariably maintained.

An arranged tool requires against it a reorientation of the workpiece during the movement, and the overlay of shift and turn produces a very much more complex course of the grab point, as it is represented in FIG 4.

The course consists still of straight pieces and circle sections, their number, distribution and length however clearly changed. At all corners the tool a time remains to the outline long at the same point, while the workpiece swivels around this point. At point A against it the grip arm stands still, changes only its orientation, while the large radius of the workpiece at the tool is led along.

From corners in the outline the same problems result, as with basis-referred interpolation with a spatially expanded tool. First of all an additional course segment does not have to be inserted, which serves only the reorientation of the workpiece, secondly can this reorientation arbitrarily fast take place. The more largely the distance between grab point and tool, the further becomes the way, which the grip arm has to put back. Since the path speed is limited, for this a sufficiently large time interval must be taken into account.

In the examples shown straight pieces are illustrated on straight pieces and Kreissegmente on Kreissegmente. This is however only because of strictly the orientation constantly held of the tool to the outline and cannot not be generalized. In all other respects it is to be noted that the speed of the grip arm on the Kreissegmenten changes by the illustration (most clearly at corners). The technologically important speeds can be determined now only grip arm-referred from the movement of the tool relative to the workpiece-firm coordinate system.

During the approximation to the stationary tool and after end of the treatment one moves the workpiece naturally relative to a stationary coordinate system. One must be able to switch therefore between both kinds of interpolation fast and as also as possible flowing with the help of a over sharpening set.

On the basis the figures 5 and 6 is described in the following the substantial bases of the interpolation. FIG 5 shows the guidance of the tool over a stationary workpiece. The movement of the tool W over a stationarily attached workpiece S, fastened to the robot hand, represents the "normal case", which is to be recapitulated here briefly.

For a well-known robotic control the course of the point of tool can be indicated, represented by the coordinate system CR relative to a freely selectable workpiece-firm basis coordinate system BA. The control counts these independently around first on absolute Cartesian coordinates incoming goods (inertial coordinates), then on robot foot coordinates RO, finally on the robot-internal coordinate system IRO. From this again the inverse transform determines the oh desired values which can be stopped. By the programmer thus the basis coordinate system BA becomes relative to the inertial coordinate system incoming goods as well as some excellent points of course (whereby one point of course is certain in each case by position and orientation Tool center POINTs thus the robot hand) relative to the basic system BA. The interpolation works in basis coordinates and supplements thus in real time the missing points of course. Each point of course must be converted to absolute Cartesian coordinates. One receives the equation which can be used in addition by pursuing the transformation chain (equation 1)

$$TWZ< \text{incoming goods}> = TBA< \text{incoming goods}> TWZ< BA> G1.1$$

Whereby T is a transformation matrix, which describes the position and orientation. The result permits the computation of the oh desired values in accordance with equation 2

$$THETA = K< ->< 1> (TWZ< IRO>) = K< ->< 1> ((TRO< \text{incoming goods}> TIRO< RO>)< ->< 1> TWZ< \text{incoming goods}>) G1.2$$

whereby $K< ->< 1>$ for the inverse transform stands.

In FIG 6 the guidance of the workpiece over a stationary tool is represented.

In this case the workpiece S is firmly connected with the robot hand and becomes over the stationary tool W, z.B. a sticking nozzle or a welding jig led. One would like to still describe and interpolate the course over workpiece-firm coordinate system. Since the workpiece is moved however now, also the reference system must along-move.

A simple and universal solution of the problem consists of putting the basic system BA into the stationary tool W and the course as the "movement" of this basic system BA relative to the grab point D.h. to define to the grip arm coordinate system on the workpiece S. The course of the tool W is thus described in workpiece-firm coordinates. This can be reached by an inversion of the basis-referred representation. In place of $TWZ< BA>$ now TBA becomes $CR> = (TWZ< BA>)< ->< 1>$ uses. By pursuing the transformation chain one receives equation 3

$$TWZ< \text{incoming goods}> TBA< CR> = TBA< \text{incoming goods}> \Rightarrow TWZ< \text{incoming goods}> = TBA< \text{incoming goods}>< TBA< CR>)< ->< 1> G1.3$$

The position of the grip arm coordinate system CR represented in absolute Cartesian coordinates, $TWZ< \text{incoming goods}>$, is exactly the same processed, as with basis-referred programming. If the course is indicated in grip arm-referred coordinates, one must interpolate it therefore first in these coordinates, which does not differ from an interpolation in a stationary basic system. The result $TBA< CR>$ is to be inverted however in each interpolation clock, still before the conversion on absolute Cartesian coordinates $TWZ< \text{incoming goods}>$. In all other respects both interpolation procedures are completely alike.

▲ top Grip arm-referred PTP sentences should accordingly to be treated. The goal of such a sentence is present likewise as $TBA< CR>$, therefore first is inverted, then into robot-internal cartesian coordinates transformed and finally into oh desired values. Here a small auxiliary expenditure only in the sentence preparation, which can remain unchanged oh-specific interpolation, develops.

After these prefaces now in the following with the procedure according to invention one deals.

Possibilities of programming

Representation of the course

In order to establish for the user as clear a conditions as possible, the programming of the course should proceed so far as possible from "visible" geometry of the workpiece and run off for moved and stationary workpiece to a large extent directly. The simple two-dimensional example in the introduction shows that a storing of the course of the robot hand is relative to the stationary tools possible in principle (also it consists only of straight lines and circular arcs), but becomes very unanschaulich. Thus only the representation of the course of the tool remains relative to one point on the workpiece, regardless of the fact that the tool is stationary.

Apart from the larger descriptiveness this method has the advantage that the course definition can take place not only via learning (Teach in) with moved workpiece, but also via learning at a firmly stretched workpiece or via assumption from CAD data, whereby the interface remains always alike for interpolation.

Learn with led workpiece

With this beginning the workpiece is moved in such a way exactly the same reached as with the later treatment and into the hand enterprise that characteristic points of the outline stop over the stationary tool (Fig 7) thereby must naturally also orientation are learned. In addition the programmer specifies, as these points are to be connected by CP or PTP sentences. The basis coordinate system should be put into the tool. Apart from the fact that tool and basis coordinate system exchange its roles here, it does not exist for the user a

difference to basis-referred programming.

At everyone of the learned points of course are well-known the control:

Position of the tool in absolute Cartesian coordinates: TBA< INCOMING GOODS>

Position of the grip arm (the TCP): TWZ< INCOMING GOODS>

As is the case for basis-referred learning one computes from it the position of the grip arm coordinate system thus here regarding the basic system, regarding the stationary tool

$TWZ< BA> = (TBA< INCOMING GOODS>)< ->< 1> TWZ< INCOMING GOODS>$

In order to store the learned point in workpiece coordinates, this result must be only inverted

$TBA< CR> = (TWZ< BA>)< ->< 1> = (TWZ< INCOMING GOODS>)< ->< 1> TBA< INCOMING GOODS>$

The points of course produced by the interpolation are inverted a second time, so that altogether exactly the learned course results.

The tool should be not really stationary, but z.B. by auxiliary axes to be moved, TBA incoming goods< is > to be stored likewise, in order to make a later interpolation possible of tool motion.

The course could be converted also to another workpiece-firm coordinate system than that of the grip arm and stored in this format. For learning and the later interpolation however no advantages would bring.

Learn with being certain workpiece (FIG 8)

Learning with led workpiece can appear occasionally as ?unmanageable?. Normally with the cartesian hand procedure the origin of the grip arm coordinate system is always used as point of reference for shifts and turns, in order to be able to position the hand relative to a stationary workpiece easily. If this is the only intended hand procedure mode, the programmer must possibly control unusually fast relative motions between tool and outline on changes of the orientation of a large workpiece. In addition it knows with directed an upward, firmly installed tool its field of work badly to sometimes grasp, so that accurate learning becomes difficult.

For the easement of such tasks the course can be defined also at a firmly installed sample workpiece. Finally only around it, the course in a well-known goes describing workpiece-firm coordinate system to possibility in the same system, which is used later than grip arm coordinate system.

During the learning procedure one naturally fastens a ?pointer? to the robot hand with well-known dimensions, so that the position into this pointer put tool tools relative to the inertial system, TWZ< incoming goods>, at any time from the oh positions can be computed.

Sample workpiece so stretched that the position of the basis coordinate system, in which the course is defined, regarding which absolute Cartesian coordinates admits is (TBA< incoming goods>).

The points which can be learned are started with the ?pointer?; from the well-known positions of the grip arm and the workpiece in absolute Cartesian coordinates one computes the position of the grip arm in workpiece coordinates

$TWZ< BA> = (TBA< INCOMING GOODS>)< ->< 1> TWZ< INCOMING GOODS>$

and this stores as course base. To here the proceeding differs from each ?normal? learning procedure only by the fact that not yet the final tool and/or. the final grip arm is used.

During the phase of operation in such a way learned data are only differently interpreted. In place of the ?pointer? now the workpiece is fastened to the hand, used as ?tool coordinate system? (grip arm coordinate system) now the reference system of the course. The changed situation of this coordinate system relative to the flange is to be communicated to the control. The basic system BA now into the stationary tool put also this change must the control be announced.

▲ top

The course learned relative to the basic system is now exactly the same used, as if it was defined from the beginning relative to the grip arm coordinate system, D.h. the points stored< as> TWZ BA are interpreted now as< TBA> CR, without changing in the numerical values something.

The course definition at the firmly installed workpiece uses the robot as measuring machine. Since with this procedure during the treatment the hand does not drive on the same course as with programming (see. the example in the introduction), places it higher requirements against the absolute accuracy of the robot, the workpiece and the setting than a learning with led workpiece. In addition different deflections of the arm come by the different loads with programming and treatment as well as a deformation of the workpiece by the changed situation.

Supplementing remarks

Basis-referred learning (Teach in) orients itself at the following principles:

1. The position of the grip arm coordinate system is always stored relative to the basic system DOLLAR COUSIN ($TWZ< BA> = DOLLAR POS_ACT$).
2. In addition the up-to-date stopped basic system is consulted. The user must ensure even that during later program processing the same or one is adjusted defined changed basis.
3. Actual values are cartesian indicated either oh-specifically or. The cartesian representation refers to DOLLAR COUSIN.
4. The learned position may be assigned also to a Frame (z. B. DOLLAR COUSIN), in order to define new three-dimensional axes.
5. It is intended, over one ?pre-setting? - mask only selected components of a position to take over. The others are not then than ? initialized? characterized (gaps) and must during movement planning be supplemented.
6. By learning aggregates know (structured constant) or variables from data lists to be specified. The latters are treated like initialized variable, are thus write protected during program processing.

For grip arm-referred learning (with led workpiece) follows in consistent continuation of this concept:

1. Apart from the basic system DOLLAR COUSIN must be considered now also the ?interpolation mode? (basis-referred or grip arm-referred).
2. In the grip arm-referred enterprise the position of the basic system is thus stored relative to the grip arm coordinate system, < TBA > CR.
3. In addition the up-to-date stopped basic system and the up-to-date stopped interpolation mode are consulted. The user must ensure even that during later program processing the same or defined changed conditions are present.
4. The announcement of the actual values effected either oh-specifically or cartesian, the cartesian representation shows the position of the basic system with grip arm-referred interpolation relative to the grip arm coordinate system, thus TBA < CR. >
5. When filling not initialized components, which can result from the pre-setting mask, movement planning must note that the preceding position was possibly still basis-referred started and therefore only to grip arm-referred representation be converted must.

In all other respects the concept for basis-referred procedure can be maintained.

Cartesian hand procedure

Reference systems for translation and rotation

For the acceleration of the learning procedure (Teachen) with led workpiece at least a further variant of the cartesian hand procedure is needed, with the translation and rotation to the stationary tool to refer. In particular the tool, thus the origin of the basic system, must be the fixed point of all turns. So far in the ACR planned hand procedure modes changes of orientation permit relative to the basic system, record thereby however the origin of the grip arm coordinate system (operating point), D.h. for turns only the direction of the axes of coordinates of the basic system evaluated not however its position. FIG 9 clarifies the difference by the example of a turn around the x axis of the basic system.

As one recognizes immediately, by turns around the origin of the basis coordinate system programming is very much facilitated, since position and orientation of the workpiece are directly at the tool from each other decoupled.

Table 1 arranges the hand procedure modes of the ACR planned so far. Three cases are differentiated internally:

1. Translation along the axes of a stationary coordinate system and rotation around the axes the same system, however with held operating point (MOV, the case described above, fig. 6 left),
 2. Translation along the axes of a stationary coordinate system, rotation around the axes of the grip arm coordinate system (TMOV),
 3. Translation and rotation along that and/or. around the axes of the grip arm coordinate system (MOV_TOOL).
- EMI11.1 around the desired effect, i.e. turns around the origin of the basic system to obtain one has now two possibilities: One interpolated basis-referred or grip arm-referred.

Basis-referred hand procedure

If one is exclusively limited to basis-referred hand procedure modes, a fourth case must be introduced (in the following with BMOV designates):

4. Translation along the axes a stationary of a coordinate system and rotation around the axes the same system, whereby these are to be interpreted as being certain axes of rotation, the direction of rotation do not thus only indicate (fig. 6 right).

In principle the same three-dimensional axes are permissible as in the first two cases. The use of DOLLAR WORLD and DOLLAR ROBROOT might bring however no practical use. It is to be considered whether this mode must be limited to DOLLAR COUSIN (z. B. for safety reasons). Such a additional definition by cases might mean on the other hand a higher implementation expenditure, there the past, regular pattern was broken through.

Regarding condition transitions, z. B. by the program mode into the command mode and back, the same strategy can be used as with the usual cartesian hand procedure.

Grip arm-referred hand procedure

?Grip arm-referred hand procedure? does not stand here for the case described above MOV_TOOL, in for translation and rotation of the grip arm on the basis the adjustment of the grip arm coordinate system to be computed (relative to the basis coordinate system). Rather now the movement of the basic system is given relative to the grip arm coordinate system over the hand procedure keys.

By this change of the point of view one receives a new, grip arm-referred variant to each of the three already defined modes. All three fulfill the criterion that with changes of orientation the operating point, which is settled in the basic system now remains constant. They differ in the choice of the reference systems for translation and rotation (FIG 10a - 10c)

1. Translation (the basis coordinate system) along the axes of the grip arm coordinate system and rotation around the axes of the same system, with held operating point (MOV grip arm-referred),
2. Translation along the axes of the grip arm coordinate system, rotation around the axes of the basis coordinate system (TMOV grip arm-referred),
3. Translation and rotation along that and/or. around the axes of the basis coordinate system (MOV_TOOL grip arm-referred). This corresponds almost to the basis-referred mode BMOV.

An advantage of this beginning consists of it that at small expenditure three hand procedure modes are available, basis-referred and grip arm-referred interpolation also in the hand enterprise is equally treated. In addition one is automatically adjusted grip arm-referred interpolated sentence a hand procedure mode during an interruption, which regards the basis coordinate system as operating point and lets thus all turns around this point take place. As will become still clearer is the case for the discussion of individual records in the command

mode, one achieves this way a homogeneous system.

As possible disadvantage it is to be noted that all movements for the stationary observer take place in opposite direction. If for instance (stationary) the tool in positive x-direction of the grip arm coordinate system is to be shifted, the grip arm in negative x-direction must move. For the programmer this can be habituation needy. In any case ones it must be supported by an appropriate, grip arm-referred actual value announcement.

Mathematical formulation of the interpolation with homogeneous transformations

A goal of this section is a uniform derivative of the equations for the different hand procedure modes. The overview is the center of attention; those to implementing equations follow concretely only in the next section. Furthermore first only the purely basis-referred hand procedure is regarded. The transition to grip arm-referred representation is then relatively simple and becomes in section 4.4 discussed.

All coordinate systems relevant for the hand procedure are arranged in FIG 11. In the following stand BEZ for any stationary reference system (DOLLAR WORLD, DOLLAR COUSIN, DOLLAR ROBROOT), IRO for the robot-internal coordinate system, to which all cartesian being before the inverse transform must be converted, and CR for the grip arm coordinate system, which is sequentially again computed with the interpolation. WZ' indicates the situation of the grip arm coordinate system in the next interpolation clock.

With the cartesian hand procedure the three coordinates x, y, z and the roll, pitch and Yaw angle (RPY angle) are interpolated A, B, C (with robots with less than six degrees of freedom individual angles are void). The question, as these coordinates in each interpolation step are determined, is first reset.

On the basis of the differences DELTA x, DELTA y, DELTA z, DELTA A, DELTA B, DELTA C valid for a scanning step one can indicate a homogeneous translation and a rotation matrix, which transfer collected the coordinate system CR into the system WZ': EMI13.1 with APPROX. = cos (DELTA A), SA = sin (DELTA A) etc.

The sequence of translation and rotation is significant: EMI13. Altogether one receives therefore six simple possibilities of the application of these differential transformations to 2:

1. $TWZ' < Z > = \text{Trans red } TWZ < BEZ >$
2. $TWZ' < BEZ > = \text{Trans } TWZ < BEZ > \text{ red}$
3. $TWZ' < BEZ > = TWZ < BEZ > \text{ of Trans red}$
4. $TWZ' < BEZ > = \text{red Trans } TWZ < BEZ >$
5. $TWZ' < BEZ > = \text{red } TWZ < BEZ > \text{ of Trans}$
6. $TWZ' < BEZ > = TWZ < BEZ > \text{ red Trans}$

Each multiplication means each multiplication from right from left that the transformation concerned in the reference coordinates is implemented, against it an operation in grip arm coordinates.

The combination [Trans red] is clearly simpler in practice to handle than [red Trans], since translation and rotation work decoupled. Thus are only the first three cases of practical interest.

The first form, [Trans red TWZ < BEZ >], represents so far the not implemented mode BMOV: A grip arm coordinate system described in reference coordinates is shifted first the axes of three-dimensional axes turned (multiplication with red from left), then in reference coordinates (multiplication with Trans from left).

The second variant corresponds to the mode TMOV: All shifts take place in reference coordinates, all turns use the axes of the grip arm coordinate system (multiplication with red from right).

▲ top

The third case describes the mode MOV_TOOL: First in grip arm coordinates one shifts, one turns then the axes of the shifted system.

The mode MOV does not have correspondence of this simple form. If one wanted to describe the arithmetic operations by multiplication of homogeneous stencils, one would have to release < TWZ > BEZ only once from its translatorischen portion (into the origin of three-dimensional axes to shift), then from left by red to multiply, which translatorischen portion again and finally also the shift of Trans near-multiplied from left add. Only by summary of the sequence from shift in the origin, rotation and back shift to a homogeneous matrix Rot* one receives again a simple expression:

$$7. (TWZ' < BEZ >) \text{ MOV} = \text{Trans Rot}^* TWZ < BEZ >$$

with EMI14.1 one regards translatorischen and rotatorischen portion within the homogeneous stencils separately, comes one however to a more efficient calculation specification (in the ACR is already implemented).

4.3 computation of translation and rotation

The transformation regulations for the different modes, represented with the help of homogeneous stencils, serve above all the analytic description. For the numeric implementation it is more meaningful to implement all stencil multiplications in front. Shift and turn can be separately from each other computed then with clearly fewer arithmetic operations and.

By Partitionieren of the current grip arm matrix one < receives > TWZ BEZ into a rotatorischen portion of R and a translatorischen portion of p: EMI15.1 all equations supply their result in the reference system furthest left illustration matrix. World, robot foot and basis coordinates (DOLLAR WORLD, DOLLAR ROBROOT, DOLLAR COUSIN) are equally meaningful. The use of the grip arm coordinate system would be formally correctly (with $R = I$ and $p = 0$), however in all four cases only grip arm-referred movements would permit, separates here thus. The result of the computations lies thus always in a stationary coordinate system forwards or at least in a coordinate system, whose movement admits from the beginning is (when using DOLLAR COUSIN with auxiliary axes).

For reasons of the uniformity the equations to here were formulated with differential translations and rotations. At some modes one can work however also with absolute data, D.h. in each interpolation clock not indicate the difference to the preceding clock, but the difference at the beginning of the movement. This applies for D to all imaging equations, in which the differential values are formulated always in reference coordinates.h. simply to be added or from left near-multiplied.

Therefore one can indicate the rotation DELTA R and the shift DELTA p in the modes BMOV and MOV both absolutely, in the mode TMOV nevertheless still the shift. The variant MOV_TOOL permits against it only differential operations, since the reference system CR (R, p) in each interpolation clock changes.

Mathematical formulation of the grip arm-referred hand procedure

After the formulation of the basis-referred hand procedure all necessary bases are already put. The only difference exists in the change of the point of view: in place of the movement of the Frames CR relative to BEZ one indicates now BEZ relative to CR, must the equations for the change from an interpolation clock to the next therefore as follows set:

1. (TBEZ' < CR >) BMOV = Trans red TBEZ < CR > < BMOV grip arm-referred)
2. (TBEZ' < CR >) MOV = Trans Rot* TBEZ < CR > < MOV grip arm-referred)
3. (TBEZ' < CR >) TMOV = Trans TBEZ < CR > red (TMOV grip arm-referred)
4. (TBEZ' < CR >) MOV_TOOL = TBEZ < CR > of Trans red (MOV_TOOL greiferbez.)

The first case (BMOV) is specified, it the origin of the grip arm coordinate system the operating point would only for the sake of completeness make, what is to be avoided by the grip arm-referred hand procedure straight. Furthermore in practice only BEZ = BA might be meaningful (as with the basis-referred BMOV).

The computing course with the other modes covers itself almost with the basis-referred hand procedure. It must only

1. at the beginning of the hand procedure the initial position TBEZ < CR > to be made available, D.h., if straight were switched to grip arm-referred interpolation, TBEZ is < CR > = (TWZ < BEZ >) < - > < 1 > to compute,
2. CR grip arm-referred computed new position < TBEZ' > in each interpolation clock into a basis-referred representation to be converted, TWZ' < BEZ > = (TBEZ' < CR >) < - > < 1 >.

Apart from it the equations derived above can be used invariably. One recognizes the relationship of this solution for grip arm-referred interpolation during program processing (section 2.2), for those likewise only Frame inversions during the sentence preparation (S. also section 7) and after each interpolation clock to be introduced.

One can accomplish the inversions naturally also in front analytically, so that the equations in basis-referred representation are present:

1. (TWZ' < BEZ >) BMOV = TWZ < BEZ > (red) < - > < 1 > (Trans) < - > < 1 >
2. (TWZ' < BEZ >) MOV_TOOL = TWZ < BEZ > (Rot*) < - > < 1 > (Trans) < - > < 1 >
3. (TWZ' < BEZ >) MOV = (red) < - > < 1 > TWZ < BEZ > (Trans) < - > < 1 >
4. (TWZ' < BEZ >) TMOV = (red) < - > < 1 > (Trans) < - > < 1 > TWZ < BEZ >

The inversions of the differential rotations and translations turn out relatively simply, there only the differential shifts and twists (DELTA x to DELTA C) the sign change. On the other hand in addition, the sequence is exchanged of rotation and translation, one could to derive and implement new thus not the existing algorithms use, but would have.

In favor of as homogeneous a structure of the control as possible it might be more favorable to accomplish the interpolation grip arm-referred with following inversion in each interpolation clock. The basis-referred representation may clarify only that these hand procedure modes actually differ from the so far-existing and that a stationary observer sees all differential shifts and twists with reverse sign.



Transformation into robot-internal coordinates

The positions of the grip arm coordinate system (TWZ' BEZ), computed < in > reference coordinates, must be converted for the computation of the oh desired values into robot-internal coordinates. Since, as be stated above, the movement of three-dimensional axes can be expected to be familiar, one receives relatively simple transformation regulations.

With the abbreviation BEZ to three-dimensional axes generally applies

$$TWZ < BEZ > = TIRO < BEZ > \quad TWZ < IRO > \Rightarrow TIRO < CR > = (TIRO < BEZ >) < - > < 1 > TWZ < BEZ >$$

The transformation matrix which can be used in each case follows from the following table:

<tb> < TABLE> Columns=3

<tb> Head Col 1: BEZ

<tb> Head Col 2: TIRO < BEZ >

<tb> Head Col 3: (TIRO < BEZ >) < - > < 1 >

<tb> DOLLAR COUSIN < September > (TBA < incoming goods >) < - > < 1 > TRO < incoming goods > TIRO < RO > < CEL AL=L > (TRO < incoming goods > TIRO < RO >) < - > < 1 > TBA < incoming goods >

<tb> DOLLAR WORLD < September > TRO < incoming goods > TIRO < RO > < September > (TRO < incoming goods > TIRO < RO >) < - > < 1 >

<tb> DOLLAR ROBROOT < September > TIRO < RO > < September > (TIRO < RO >) < - > < 1 >

<tb> < /TABLE>

Production of the speed profiles

The course of DELTA x, DELTA y, DELTA z, DELTA A, DELTA B and DELTA C can be produced for the new mode BMOV in the same way as with the existing modes. Is not necessary a special treatment.

This is called concrete that for each direction of motion (each component DELTA x to DELTA C) a ?continuous profile? is computed, which

consists only of a phase of constant speed. The increase in speed at the beginning and end of the movement is sanded by the Override regulation.

The constant speeds mentioned are effective by machine data given and only for the components, whose procedure keys are kept pressed. All other components are zero.

(19)



Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets



(11) Veröffentlichungsnummer: **0 671 246 A2**

(12)

EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG

(21) Anmeldenummer: **95103349.7**

(51) Int. Cl.⁶: **B25J 9/16, G05B 19/425**

(22) Anmeldetag: **08.03.95**

(30) Priorität: **09.03.94 DE 4407924**

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:
13.09.95 Patentblatt 95/37

(84) Benannte Vertragsstaaten:
DE IT SE

(71) Anmelder: **SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT**
Wittelsbacherplatz 2
D-80333 München (DE)

(72) Erfinder: **Liepert, Bernd, Dipl.-Math.**
Bernhard Monath-Str. 8
D-86405 Meitingen (DE)
Erfinder: **Schmidt, Wolfgang, Dr.**
Bechhofener Weg 32
D-91315 Höchstadt (DE)
Erfinder: **Olomski, Jürgen, Dr.**
Von-Andrechs-Weg 24
D-91074 Herzogenaurach (DE)
Erfinder: **Seeger, Guido, Dr.**
Friedrich-Bauer-Str. 40
D-91058 Erlangen (DE)

(54) Greiferbezogenes Handverfahren.

(57) Um das Teachen einer Robotersteuerung zu erleichtern, wird dafür gesorgt, daß der Drehpunkt bei Orientierungsänderungen immer im Ursprung eines Basiskoordinatensystems liegt.

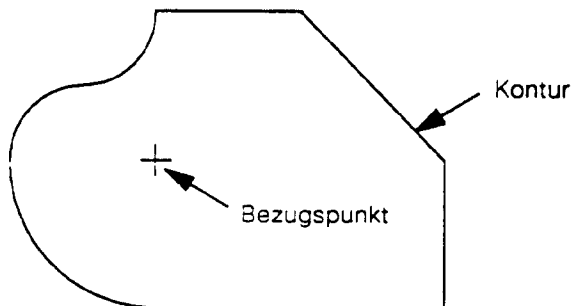


FIG 1

Bei der numerisch gesteuerten Bearbeitung von Werkstücken durch eine mehrachsige Maschine, z.B. einen Roboter kann es entscheidende technologische Vorteile bringen, wenn gegenüber der herkömmlichen Bearbeitung bei der das Werkzeug von der Roboterhand über ein ortsfestes Werkstück geführt wird, das Werkzeug ortsfest angebracht und das Werkstück von der Roboterhand über das ortsfeste Werkzeug geführt wird. Für die letztgenannte Bearbeitungsart wird durch die Robotersteuerung eine sogenannte greiferbezogene Interpolation vorgenommen, wogegen bei der herkömmlichen Führung des Werkzeuges über ein ortsfestes Werkstück basisbezogen interpoliert wird.

Die greiferbezogene Interpolation bringt dem Anwender mehrere Vorteile, u. a. wird der Aufbau einfacher, man benötigt nur noch einen Greifer und spart die Einspannvorrichtung für das Werkstück, ein ortsfestes Werkzeug unterliegt weniger Beschränkungen in Gewicht und Abmessungen und die Versorgungseinrichtungen für Schweißdraht, Kühlmittel werden deutlich einfacher, da sie nicht über die Roboterarme zugeführt werden müssen. Zweitens erzielt man kürzere Taktzeiten, da man das Werkstück in einem Arbeitsgang ohne Anhalten und Umgreifen heranbringen, bearbeiten und wieder abtransportieren kann.

Aufgabe der Erfindung ist es bei der greiferbezogenen Interpolation das Teachen mitgeführtem Werkstück zu erleichtern. Dazu wird eine Variante des kartesischen Handverfahrens benötigt, bei der Translation und Rotation sich auf das ortsfeste Werkzeug beziehen. Insbesondere muß das Werkzeug, das als Ursprung des Basiskoordinatensystems gewählt wird, der Fixpunkt aller Drehungen sein.

Diese Aufgabe wird durch die Merkmale der Patentansprüche gelöst.

Ein Ausführungsbeispiel der Erfindung wird im folgenden anhand der Zeichnung näher erläutert. Dabei zeigen:

- FIG 1 bis FIG 4 Veranschaulichung der greiferbezogenen Interpolation,
- FIG 5 die Führung eines an einer Roboterhand angebrachten Werkzeugs über einem ortsfesten Werkstück,
- FIG 6 die Führung eines an einer Roboterhand angebrachten Werkstücks über einem ortsfesten Werkzeug,
- FIG 7 das Lernen der Bahn mitgeführtem Werkzeug,
- FIG 8 das Lernen der Bahn mit fest aufgespanntem Werkstück,
- FIG 9 das kartesische Handverfahren mit Drehungen um die Achsen des Basissystems,
- FIG 10a bis FIG 10c greiferbezogene Handverfahr-Modi im Vergleich.

Bevor auf das greiferbezogene Handverfahren eingegangen wird, sei anhand der Figuren 1 bis 4 zunächst das Problem der greiferbezogenen Interpolation veranschaulicht.

Die Frage, wie sich die Roboterhand ändern muß, wenn man nicht das Werkzeug sondern das Werkstück führt, aber die gleiche Relativbewegung zwischen beiden erhalten möchte entzieht sich sehr schnell dem Vorstellungsvermögen. An einem einfachen zweidimensionalen Beispiel, wie es anhand der Figuren 1 bis 4 dargestellt ist, lassen sich einige grundsätzliche Eigenheiten gut klarmachen. FIG 1 zeigt ein Werkstück, dessen Kontur aus geraden Stücken und Kreisabschnitten zusammengesetzt ist. Spannt man dieses Werkstück fest auf, so entspricht die gezeichnete Kontur der Bahn der Werkzeugspitze. Ist das Werkzeug rotationssymmetrisch, läßt sich die Kontur mit einer reinen Translationsbewegung abfahren.

Ein gerichtetes Werkzeug muß dagegen immer eine bestimmte Orientierung zur Kontur einhalten. Die Änderung der Orientierung ist anhand von FIG 2 durch die an der Kontur angreifenden kleinen Pfeile verdeutlicht. Setzt man das Werkzeug fest und bewegt das Werkstück, zeigen diese beiden Fälle sehr verschiedene Auswirkungen auf die Bewegung der Roboterhand. In FIG 3 wird das Werkstück von der Roboterhand im Bezugspunkt (= Greifpunkt) gegriffen und es wird die Bewegung dieses Punktes betrachtet, die nötig ist, um die Kontur am feststehenden Werkstück entlang zu führen.

Bei rotationssymmetrischen Werkzeug kann die Orientierung des Werkstücks stets beibehalten werden, lediglich der Kontakt zwischen Kontur und Werkzeug ist sicherzustellen. Die resultierende Bewegung entsteht dann einfach durch Spiegelung der Werkstückkontur in der Mitte der Verbindungslinie zwischen Bezugspunkt und Werkzeug. In diesem Fall läßt sich eine greiferbezogen programmierte Bahn offenbar sehr einfach umrechnen. Man muß nur alle Stützpunkte der Bahn spiegeln und kann Abfolge und Länge der Bahnsegmente unverändert beibehalten.

Ein gerichtetes Werkzeug erfordert dagegen eine Umorientierung des Werkstücks während der Bewegung, und die Überlagerung von Verschiebung und Drehung erzeugt eine sehr viel komplexere Bahn des Greifpunktes, wie sie in FIG 4 dargestellt ist.

Die Bahn besteht zwar nach wie vor aus geraden Stücken und Kreisabschnitten, deren Anzahl, Verteilung und Länge hat sich aber deutlich geändert. An allen Ecken der Kontur verharret das Werkzeug eine Zeit lang am gleichen Punkt, während das Werkstück um diesen Punkt schwenkt. An Punkt A steht dagegen der Greifer still, ändert lediglich seine Orientierung, während der große Radius des Werkstücks

am Werkzeug entlang geführt wird.

Durch Ecken in der Kontur entstehen dieselben Probleme, wie bei basisbezogener Interpolation mit einem räumlich ausgedehnten Werkzeug. Erstens muß ein zusätzliches Bahnsegment eingefügt werden, das lediglich der Umorientierung des Werkstücks dient, zweitens kann diese Umorientierung nicht beliebig schnell erfolgen. Je größer der Abstand zwischen Greifpunkt und Werkzeug, desto weiter wird der Weg, den der Greifer zurückzulegen hat. Da die Bahngeschwindigkeit begrenzt ist, muß hierfür eine ausreichend große Zeitspanne eingeplant werden.

In den gezeigten Beispielen werden gerade Stücken auf gerade Stücke abgebildet und Kreissegmente auf Kreissegmente. Dies liegt jedoch nur an der streng konstant gehaltenen Orientierung des Werkzeugs zur Kontur und kann nicht verallgemeinert werden. Im übrigen ist festzuhalten, daß sich die Geschwindigkeit des Greifers auf den Kreissegmenten durch die Abbildung ändert (am deutlichsten an Ecken). Die technologisch wichtigen Geschwindigkeiten können jetzt nur noch greiferbezogen bestimmt werden und zwar aus der Bewegung des Werkzeugs relativ zum werkstückfesten Koordinatensystem.

Bei der Annäherung an das ortsfeste Werkzeug und nach Ende der Bearbeitung bewegt man das Werkstück sinnvollerweise relativ zu einem ortsfesten Koordinatensystem. Man muß daher zwischen beiden Interpolationsarten schnell und möglichst auch fließend mit Hilfe eines Überschleifsatzes umschalten können.

Anhand der Figuren 5 und 6 werden im folgenden die wesentlichen Grundlagen der Interpolation beschrieben. FIG 5 zeigt die Führung des Werkzeugs über ein ortsfestes Werkstück. Die Bewegung des an der Roboterhand befestigten Werkzeugs W über ein ortsfest angebrachtes Werkstück S stellt den "Normalfall" dar, der hier kurz rekapituliert werden soll.

Bei einer bekannten Robotersteuerung kann die Bahn des Werkzeugpunktes, dargestellt durch das Koordinatensystem WZ relativ zu einem frei wählbaren werkstückfesten Basiskoordinatensystem BA angegeben werden. Die Steuerung rechnet diese selbständig um und zwar zunächst auf Weltkoordinaten WE (Inertialkoordinaten), dann auf Roboterfußkoordinaten RO, schließlich auf das roboterinterne Koordinatensystem IRO. Daraus wiederum ermittelt die Rücktransformation die einzustellenden Achssollwerte. Vom Programmierer werden also das Basiskoordinatensystem BA relativ zum Inertialkoordinatensystem WE sowie einige ausgezeichnete Bahnpunkte (wobei ein Bahnpunkt jeweils durch Position und Orientierung des Tool-Center-Points also der Roboterhand bestimmt ist) relativ zu dem Basissystem BA. Die Interpolation arbeitet in Basiskoordinaten und ergänzt somit in Echtzeit die fehlenden Bahnpunkte. Jeder Bahnpunkt muß auf Weltkoordinaten BE umgerechnet werden. Die dazu anzuwendende Gleichung erhält man durch Verfolgen der Transformationskette (Gleichung 1)

$$\mathbf{T}_{WZ}^{WE} = \mathbf{T}_{BA}^{WE} \mathbf{T}_{WZ}^{BA} \quad \text{G1.1}$$

Wobei \mathbf{T} eine Transformationsmatrix ist, die die Position und Orientierung beschreibt. Das Ergebnis erlaubt die Berechnung der Achssollwerte gemäß Gleichung 2

$$\Theta = \mathbf{K}^{-1}(\mathbf{T}_{WZ}^{IRO}) = \mathbf{K}^{-1}((\mathbf{T}_{RO}^{WE} \mathbf{T}_{IRO}^{RO})^{-1} \mathbf{T}_{WZ}^{WE}) \quad \text{G1.2}$$

wobei \mathbf{K}^{-1} für die Rücktransformation steht.

In FIG 6 ist die Führung des Werkstücks über einem ortsfesten Werkzeug dargestellt.

In diesem Fall ist das Werkstück S fest mit der Roboterhand verbunden und wird über das stationäre Werkzeug W, z.B. eine Klebedüse oder eine Schweißvorrichtung geführt. Man möchte die Bahn nach wie vor über ein werkstückfestes Koordinatensystem beschreiben und interpolieren. Da aber jetzt das Werkstück bewegt wird, muß sich auch das Bezugssystem mitbewegen.

Eine einfache und universelle Lösung des Problems besteht darin, das Basissystem BA in das ortsfeste Werkzeug W zu legen und die Bahn als die "Bewegung" dieses Basissystems BA relativ zum Greifpunkt d.h. zum Greiferkoordinatensystem auf dem Werkstück S zu definieren. Die Bahn des Werkzeugs W wird also in werkstückfesten Koordinaten beschrieben. Dies läßt sich durch eine Inversion der basisbezogenen Darstellung erreichen. Anstelle von \mathbf{T}_{WZ}^{BA} wird nun $\mathbf{T}_{BA}^{WZ} = (\mathbf{T}_{WZ}^{BA})^{-1}$ verwendet. Durch Verfolgen der Transformationskette erhält man Gleichung 3

$$\mathbf{T}_{WZ}^{WE} \mathbf{T}_{BA}^{WZ} = \mathbf{T}_{BA}^{WE} \Rightarrow \mathbf{T}_{WZ}^{WE} = \mathbf{T}_{BA}^{WE} (\mathbf{T}_{BA}^{WZ})^{-1} \quad \text{G1.3}$$

Die Position des Greiferkoordinatensystems WZ dargestellt in Weltkoordinaten, \mathbf{T}_{WZ}^{WE} , wird genauso weiterverarbeitet, wie bei basisbezogener Programmierung. Ist die Bahn in greiferbezogenen Koordinaten angegeben, muß man sie demnach zunächst in diesen Koordinaten interpolieren, was sich nicht von einer

Interpolation in einem ortsfesten Basissystem unterscheidet. Das Ergebnis T_{BA}^{WZ} ist jedoch in jedem Interpolationstakt zu invertieren, noch vor der Umrechnung auf Weltkoordinaten T_{WZ}^{WE} . Im übrigen sind beide Interpolationsverfahren völlig gleich.

Greiferbezogene PTP-Sätze sind entsprechend zu behandeln. Der Zielpunkt eines solchen Satzes liegt ebenfalls als T_{BA}^{WZ} vor, wird daher zunächst invertiert, dann in roboterinterne kartesische Koordinaten transformiert und schließlich in Achssollwerte. Hier entsteht nur in der Satzaufbereitung ein geringer Zusatzaufwand, die achsspezifische Interpolation kann unverändert bleiben.

Nach diesen Vorbemerkungen wird nun im folgenden auf das erfindungsgemäße Verfahren eingegangen.

Möglichkeiten der Programmierung

Darstellung der Bahn

Um für den Anwender möglichst übersichtliche Verhältnisse zu schaffen, sollte die Programmierung der Bahn soweit als möglich von der "sichtbaren" Geometrie des Werkstücks ausgehen und für bewegtes und ortsfestes Werkstück weitgehend gleich ablaufen. Das einfache zweidimensionale Beispiel in der Einleitung zeigt, daß eine Abspeicherung der Bahn der Roboterhand relativ zum ortsfesten Werkzeug zwar prinzipiell möglich ist (auch sie besteht nur aus Geraden und Kreisbögen), aber sehr unanschaulich wird. Es bleibt also nur die Darstellung der Bahn des Werkzeugs relativ zu einem Punkt auf dem Werkstück, ungeachtet der Tatsache, daß das Werkzeug ortsfest ist.

Neben der größeren Anschaulichkeit hat diese Methode den Vorteil, daß die Bahndefinition nicht nur durch Lernen (Teach-In) mit bewegtem Werkstück, sondern auch durch Lernen an einem fest aufgespannten Werkstück oder durch Übernahme von CAD-Daten erfolgen kann, wobei die Schnittstelle zur Interpolation stets gleich bleibt.

Lernen mit geführtem Werkstück

Bei diesem Ansatz wird das Werkstück genauso gegriffen wie bei der späteren Bearbeitung und im Handbetrieb so bewegt, daß charakteristische Punkte der Kontur über das ortsfeste Werkzeug zu stehen kommen (Fig 7) Dabei muß natürlich auch die Orientierung gelernt werden. Der Programmierer spezifiziert außerdem, wie diese Punkte durch CP- oder PTP-Sätze zu verbinden sind. Das Basiskoordinatensystem sollte in das Werkzeug gelegt werden. Abgesehen von der Tatsache, daß Werkzeug- und Basiskoordinatensystem hier ihre Rollen vertauschen, besteht für den Anwender kein Unterschied zur basisbezogenen Programmierung.

An jedem der gelernten Bahnpunkte sind der Steuerung bekannt:

- Position des Werkzeugs in Weltkoordinaten: T_{BA}^{WE}
- Position des Greifers (des TCP): T_{WZ}^{WE}

Wie beim basisbezogenen Lernen berechnet man daraus die Position des Greiferkoordinatensystems in Bezug auf das Basissystem, also hier in Bezug auf das ortsfeste Werkzeug

$$T_{WZ}^{BA} = (T_{BA}^{WE})^{-1} T_{WZ}^{WE}$$

Um den gelernten Punkt in Werkstückkoordinaten zu speichern, muß dieses Ergebnis lediglich invertiert werden

$$T_{BA}^{WZ} = (T_{WZ}^{BA})^{-1} = (T_{WZ}^{WE})^{-1} T_{BA}^{WE}$$

Die von der Interpolation erzeugten Bahnpunkte werden ein zweites Mal invertiert, so daß sich insgesamt genau die gelernte Bahn ergibt.

Sollte das Werkzeug nicht wirklich ortsfest sein, sondern z.B. durch Zusatzachsen bewegt werden, ist T_{BA}^{WE} ebenfalls abzuspeichern, um eine spätere Interpolation der Werkzeugbewegung zu ermöglichen.

Die Bahn könnte auch auf ein anderes werkstückfestes Koordinatensystem als das des Greifers umgerechnet und in diesem Format gespeichert werden. Für das Lernen und die spätere Interpolation würde das jedoch keine Vorteile bringen.

Lernen mit feststehendem Werkstück (FIG 8)

Das Lernen mit geführtem Werkstück kann gelegentlich als "unhandlich" erscheinen. Normalerweise wird beim kartesischen Handverfahren stets der Ursprung des Greiferkoordinatensystems als Bezugspunkt für Verschiebungen und Drehungen verwendet, um die Hand relativ zu einem ortsfesten Werkstück leicht positionieren zu können. Ist dies der einzige vorgesehene Handverfahr-Modus, muß der Programmierer bei Änderungen der Orientierung eines großen Werkstücks möglicherweise ungewohnt schnelle Relativbewegungen zwischen Werkzeug und Kontur beherrschen. Außerdem kann er bei einem aufwärts gerichteten, fest montierten Werkzeug sein Arbeitsfeld manchmal schlecht überblicken, so daß ein exaktes Lernen schwierig wird.

Zur Erleichterung solcher Aufgaben kann die Bahn auch an einem fest montierten Muster-Werkstück definiert werden. Es geht schließlich nur darum, die Bahn in einem bekannten, werkstückfesten Koordinatensystem zu beschreiben, nach Möglichkeit in demselben System, das später als Greiferkoordinatensystem verwendet wird.

Während des Lernvorganges befestigt man an der Roboterhand sinnvollerweise einen "Zeiger" mit bekannten Abmessungen, so daß die Position des in diesen Zeiger gelegten Werkzeugkoordinatensystem relativ zum Inertialsystem, T_{WZ}^{WE} , jederzeit aus den Achsstellungen berechnet werden kann.

Das Muster-Werkstück wird so aufgespannt, daß die Position des Basiskoordinatensystems, in dem die Bahn definiert wird, in Bezug auf die Weltkoordinaten bekannt ist (T_{BA}^{WE}).

Die zu lernenden Punkte werden mit dem "Zeiger" angefahren; aus den bekannten Positionen des Greifers und des Werkstücks in Weltkoordinaten berechnet man die Position des Greifers in Werkstückkoordinaten

$$T_{WZ}^{BA} = (T_{BA}^{WE})^{-1} T_{WZ}^{WE}$$

und speichert dies als Bahnstützpunkt ab. Bis hierher unterscheidet sich die Vorgehensweise von jedem "normalen" Lernvorgang nur dadurch, daß noch nicht das endgültige Werkzeug bzw. der endgültige Greifer verwendet wird.

Beim Bearbeitungsvorgang werden die so gelernten Daten lediglich anders interpretiert. Anstelle des "Zeigers" wird nun das Werkstück an der Hand befestigt, als "Werkzeugkoordinatensystem" (Greiferkoordinatensystem) wird nun das Bezugssystem der Bahn verwendet. Die geänderte Lage dieses Koordinatensystems relativ zum Flansch ist der Steuerung mitzuteilen. Das Basissystem BA wird nun in das ortsfeste Werkzeug gelegt auch diese Änderung muß der Steuerung bekanntgemacht werden.

Die relativ zum Basissystem gelernte Bahn wird nun genauso verwendet, als sei sie von vornherein relativ zum Greiferkoordinatensystem definiert worden, d.h. die als T_{WZ}^{BA} abgespeicherten Punkte werden nun als T_{BA}^{WZ} interpretiert, ohne an den Zahlenwerten etwas zu ändern.

Die Bahndefinition am fest montierten Werkstück nutzt den Roboter als Meßmaschine. Da bei diesem Verfahren während der Bearbeitung die Hand nicht auf der gleichen Bahn fährt wie bei der Programmierung (vgl. das Beispiel in der Einleitung), stellt es höhere Anforderungen an die absolute Genauigkeit des Roboters, des Werkstückes und der Aufspannung als das Lernen mit geführtem Werkstück. Hinzu kommen unterschiedliche Durchbiegungen des Arms durch die verschiedenen Traglasten bei Programmierung und Bearbeitung sowie eine Verformung des Werkstücks durch die veränderte Lage.

Ergänzende Bemerkungen

- Das basisbezogene Lernen (Teach-In) orientiert sich an folgenden Grundsätzen:
1. Es wird immer die Position des Greiferkoordinatensystems relativ zum Basissystem \$BASE abgespeichert ($T_{WZ}^{BA} = \POS_ACT).
 2. Dazu wird das *aktuell eingestellte* Basissystem herangezogen. Der Anwender muß selbst dafür sorgen, daß bei der späteren Programmbearbeitung dieselbe oder eine definiert veränderte Basis eingestellt wird.
 3. Istwerte werden entweder achsspezifisch oder kartesisch angezeigt. Die kartesische Darstellung bezieht sich auf \$BASE.
 4. Die gelernte Position darf auch einem Frame zugewiesen werden (z. B. \$BASE), um ein neues Bezugskoordinatensystem zu definieren.
 5. Es ist vorgesehen, über eine "Voreinstellungs"-Maske nur ausgewählte Komponenten einer Position zu übernehmen. Die anderen sind dann als "nicht initialisiert" gekennzeichnet (Lücken) und müssen während der Bewegungsplanung ergänzt werden.

6. Durch Lernen können Aggregate (strukturierte Konstanten) oder Variablen aus Datenlisten festgelegt werden. Letztere werden wie initialisierte Variable behandelt, sind bei der Programmbearbeitung also schreibgeschützt.

Für das greiferbezogene Lernen (mitgeführtem Werkstück) folgt in konsequenter Fortsetzung dieses

5 Konzepts:

1. Neben dem Basissystem \$BASE muß nun auch der "Interpolationsmodus" (basisbezogen oder greiferbezogen) beachtet werden.

2. Im greiferbezogenen Betrieb wird die Position des Basissystems relativ zum Greiferkoordinatensystem, also T_{BA}^{WZ} abgespeichert.

10 3. Dazu werden das *aktuell eingestellte* Basissystem und der *aktuell eingestellte* Interpolationsmodus herangezogen. Der Anwender muß selbst dafür sorgen, daß bei der späteren Programmbearbeitung die gleichen oder definiert veränderte Verhältnisse vorliegen.

4. Die Anzeige der Istwerte erfolgt entweder achsspezifisch oder kartesisch, die kartesische Darstellung zeigt bei greiferbezogener Interpolation die Position des Basissystems relativ zum Greiferkoordinatensystem, also T_{BA}^{WZ} .

15 5. Beim Füllen nicht initialisierter Komponenten, die durch die Voreinstellungs-Maske entstehen können, muß die Bewegungsplanung beachten, daß die vorhergehende Position eventuell noch basisbezogen angefahren wurde und daher erst auf greiferbezogene Darstellung umgerechnet werden muß.

Im übrigen kann das Konzept für basisbezogenes Verfahren beibehalten werden.

20

Kartesisches Handverfahren

Bezugssysteme für Translation und Rotation

25 Zur Beschleunigung des Lernvorgangs (Teachen) mitgeführtem Werkstück wird mindestens eine weitere Variante des kartesischen Handverfahrens benötigt, bei der Translation und Rotation sich auf das ortsfeste Werkzeug beziehen. Insbesondere muß das Werkzeug, also der Ursprung des Basissystems, der Fixpunkt aller Drehungen sein. Die bisher in der ACR vorgesehenen Handverfahr-Modi erlauben zwar Orientierungsänderungen relativ zum Basissystem, halten dabei aber den Ursprung des Greiferkoordinatensystems (Arbeitspunkt) fest, d.h. für Drehungen wird nur die Richtung der Koordinatenachsen des Basissystems ausgewertet nicht aber seine Position. FIG 9 verdeutlicht den Unterschied am Beispiel einer Drehung um die x-Achse des Basissystems.

30 Wie man sofort erkennt, wird durch Drehungen um den Ursprung des Basiskoordinatensystems die Programmierung sehr erleichtert, da Position und Orientierung des Werkstücks direkt am Werkzeug voneinander entkoppelt sind.

35 Tabelle 1 stellt die bisher vorgesehenen Handverfahr-Modi der ACR zusammen. Intern werden drei Fälle unterschieden:

1. Translation längs der Achsen eines ortsfesten Koordinatensystems und Rotation um die Achsen desselben System, allerdings bei festgehaltenem Arbeitspunkt (MOV, der oben beschriebene Fall, Bild 6 links),

40 2. Translation längs der Achsen eines ortsfesten Koordinatensystems, Rotation um die Achsen des Greiferkoordinatensystems (TMOV),

3. Translation und Rotation längs der bzw. um die Achsen des Greiferkoordinatensystems (MOV_TOOL).

45

50

55

5	Bezugssystem	Rotation			
	Translation	WORLD	BASE	ROBROOT	TCP
10	WORLD	MOV			TMOV
15	BASE		MOV		TMOV
	ROBROOT			MOV	TMOV
	TCP				MOV_TOOL

Tabelle 1: Varianten des kartesischen Handverfahrens

Um die gewünschte Wirkung, nämlich Drehungen um den Ursprung des Basissystems, zu erzielen, hat man nun zwei Möglichkeiten: Man interpoliert basisbezogen oder greiferbezogen.

25 *Basisbezogenes Handverfahren*

Beschränkt man sich ausschließlich auf basisbezogene Handverfahr-Modi, muß ein vierter Fall eingeführt werden (im folgenden mit BMOV bezeichnet):

- 30 4. Translation längs der Achsen eines ortsfesten Koordinatensystems und Rotation um die Achsen desselben System, wobei diese als feststehende Drehachsen zu interpretieren sind, also nicht nur die Drehrichtung angeben (Bild 6 rechts).

Grundsätzlich sind dieselben Bezugskoordinatensysteme zulässig wie in den ersten beiden Fällen. Die Verwendung von \$WORLD und \$ROBROOT dürfte allerdings keinen praktischen Nutzen bringen. Es ist daher zu überlegen, ob dieser Modus auf \$BASE eingeschränkt werden muß (z. B. aus Sicherheitsgründen).

35 Eine solche zusätzliche Fallunterscheidung dürfte andererseits einen höheren Implementierungsaufwand bedeuten, da das bisherige, regelmäßige Schema durchbrochen würde. Im Hinblick auf Zustandsübergänge, z. B. vom Programm-Modus in den Kommando-Modus und zurück, kann die gleiche Strategie verwendet werden wie beim gewöhnlichen kartesischen Handverfahren.

40 *Greiferbezogenes Handverfahren*

"Greiferbezogenes Handverfahren" steht hier *nicht* für den oben beschriebenen Fall MOV_TOOL, in dem Translation und Rotation des Greifers anhand der Ausrichtung des Greiferkoordinatensystems berechnet werden (relativ zum Basiskoordinatensystem). Vielmehr wird nun die Bewegung des *Basissystems* relativ zum Greiferkoordinatensystem über die Handverfahrtasten vorgegeben.

45 Durch diesen Wechsel des Blickwinkels erhält man zu jedem der drei bereits definierten Modi eine neue, greiferbezogene Variante. Alle drei erfüllen das Kriterium, daß bei Orientierungsänderungen der Arbeitspunkt, der nun im Basissystem angesiedelt ist, konstant bleibt. Sie unterscheiden sich in der Wahl der Bezugssysteme für Translation und Rotation (FIG 10a - 10c)

- 50 1. Translation (des Basiskoordinatensystems) längs der Achsen des Greiferkoordinatensystems und Rotation um die Achsen desselben Systems, bei festgehaltenem Arbeitspunkt (MOV greiferbezogen),
 2. Translation längs der Achsen des Greiferkoordinatensystems, Rotation um die Achsen des Basiskoordinatensystems (TMOV greiferbezogen),
 3. Translation und Rotation längs der bzw. um die Achsen des Basiskoordinatensystems (MOV_TOOL greiferbezogen). Dies entspricht nahezu dem basisbezogenen Modus BMOV.

55 Ein Vorteil dieses Ansatzes besteht darin, daß mit geringem Aufwand drei Handverfahr-Modi zur Verfügung stehen, basisbezogene und greiferbezogene Interpolation werden auch im Handbetrieb gleichberechtigt behandelt. Außerdem ist bei einer Unterbrechung eines greiferbezogen interpolierten Satzes

automatisch ein Handverfahr-Modus eingestellt, der das Basiskoordinatensystem als Arbeitspunkt betrachtet und somit alle Drehungen um diesen Punkt erfolgen läßt. Wie bei der Diskussion von Einzelsätzen im Kommando-Modus noch klarer werden wird, erreicht man auf diesem Weg ein homogeneres System.

Als möglicher Nachteil ist festzuhalten, daß alle Bewegungen für den ortsfesten Beobachter in entgegengesetzter Richtung erfolgen. Wenn etwa das (ortsfeste) Werkzeug in positiver x-Richtung des Greiferkoordinatensystems verschoben werden soll, muß sich der Greifer in negativer x-Richtung bewegen. Für den Programmierer kann dies gewöhnungsbedürftig sein. Auf jeden Fall muß er durch eine entsprechende, greiferbezogene Istwert-Anzeige unterstützt werden.

10 Mathematische Formulierung der Interpolation mit homogenen Transformationen

Ziel dieses Abschnittes ist eine einheitliche Ableitung der Gleichungen für die verschiedenen Handverfahr-Modi. Dabei steht die Übersicht im Vordergrund; die konkret zu implementierenden Gleichungen folgen erst im nächsten Abschnitt. Ferner wird zunächst nur das rein basisbezogene Handverfahren betrachtet. Der Übergang auf greiferbezogene Darstellung ist dann relativ einfach und wird in Abschnitt 4.4 besprochen.

Alle für das Handverfahren relevanten Koordinatensysteme sind in FIG 11 zusammengestellt. Im folgenden steht BEZ für ein beliebiges ortsfestes Bezugssystem (\$WORLD, \$BASE, \$ROBROOT), IRO für das roboterinterne Koordinatensystem, auf das alle kartesischen Sollwerte vor der Rücktransformation umgerechnet werden müssen, und WZ für das Greiferkoordinatensystem, das bei der Interpolation fortlaufend neu berechnet wird. WZ' gibt die Lage des Greiferkoordinatensystems im nächsten Interpolationstakt an.

Beim kartesischen Handverfahren werden die drei Koordinaten x, y, z und die Roll-, Pitch- und Yaw-Winkel (RPY-Winkel) A, B, C interpoliert (bei Robotern mit weniger als sechs Freiheitsgraden entfallen einzelne Winkel). Die Frage, wie diese Koordinaten in jedem Interpolationsschritt bestimmt werden, sei zunächst zurückgestellt.

Ausgehend von den für einen Abtastschritt gültigen Differenzen $\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta A, \Delta B, \Delta C$ kann man eine homogene Translations- und eine Rotationsmatrix angeben, die zusammengekommen das Koordinatensystem WZ in das System WZ' überführen:

$$\text{Trans}(\Delta x, \Delta y, \Delta z) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta x \\ 0 & 1 & 0 & \Delta y \\ 0 & 0 & 1 & \Delta z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} & & & \Delta p \\ & & & \\ & & & \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\text{Rot}(\Delta A, \Delta B, \Delta C) = \begin{bmatrix} \text{RPY}(\Delta A, \Delta B, \Delta C) & 0 \\ & 0 \\ & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} \Delta R & 0 \\ & 0 \\ & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\text{RPY}(\Delta A, \Delta B, \Delta C) = \text{Rot}(z, \Delta A) \text{Rot}(y, \Delta B) \text{Rot}(x, \Delta C)$$

$$= \begin{bmatrix} C_A C_B & -S_A C_C + C_A S_B S_C & S_A S_C + C_A S_B C_C \\ S_A C_B & C_A C_C + S_A S_B S_C & -C_A S_C + S_A S_B C_C \\ -S_B & C_B S_C & C_B C_C \end{bmatrix}$$

mit $C_A = \cos(\Delta A)$, $S_A = \sin(\Delta A)$ usw.

Die Reihenfolge von Translation und Rotation ist signifikant:

$$\begin{aligned}
 \text{Rot} \bullet \text{Trans} &= \begin{bmatrix} \Delta R & | & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & | & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & | & \Delta p \\ \hline 0 & 0 & 0 & | & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta R & | & \Delta R \Delta p \\ \hline 0 & 0 & 0 & | & 1 \end{bmatrix} \\
 \text{Trans} \bullet \text{Rot} &= \begin{bmatrix} \Delta R & | & \Delta p \\ \hline 0 & 0 & 0 & | & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Insgesamt erhält man daher sechs einfache Möglichkeiten der Anwendung dieser differentiellen Transformationen:

1. $T_{WZ}^Z = \text{Trans Rot } T_{WZ}^{\text{BEZ}}$
2. $T_{WZ}^{\text{BEZ}} = \text{Trans } T_{WZ}^{\text{BEZ}} \text{ Rot}$
3. $T_{WZ}^{\text{BEZ}} = T_{WZ}^{\text{BEZ}} \text{ Trans Rot}$
4. $T_{WZ}^{\text{BEZ}} = \text{Rot Trans } T_{WZ}^{\text{BEZ}}$
5. $T_{WZ}^{\text{BEZ}} = \text{Rot } T_{WZ}^{\text{BEZ}} \text{ Trans}$
6. $T_{WZ}^{\text{BEZ}} = T_{WZ}^{\text{BEZ}} \text{ Rot Trans}$

Dabei bedeutet jede Multiplikation von links, daß die betreffende Transformation in den Bezugskoordinaten ausgeführt wird, jede Multiplikation von rechts dagegen eine Operation in Greiferkoordinaten.

Die Kombination [Trans Rot] ist in der Praxis deutlich einfacher zu handhaben als [Rot Trans], da Translation und Rotation entkoppelt wirken. Somit sind nur noch die ersten drei Fälle von praktischem Interesse.

Die erste Form, [Trans Rot T_{WZ}^{BEZ}], stellt den bisher nicht implementierten Modus BMOV dar: Ein in Bezugskoordinaten beschriebenes Greiferkoordinatensystem wird zunächst um die Achsen des Bezugskoordinatensystems gedreht (Multiplikation mit Rot von links), dann in Bezugskoordinaten verschoben (Multiplikation mit Trans von links).

Die zweite Variante entspricht dem Modus TMOV: Alle Verschiebungen erfolgen in Bezugskoordinaten, alle Drehungen verwenden die Achsen des Greiferkoordinatensystems (Multiplikation mit Rot von rechts).

Der dritte Fall beschreibt den Modus MOV_TOOL: Zunächst wird in Greiferkoordinaten verschoben, dann um die Achsen des verschobenen Systems gedreht.

Der Modus MOV hat keine Entsprechung dieser einfachen Form. Wollte man die Rechenoperationen durch Multiplikation homogener Matrizen beschreiben, müßte man T_{WZ}^{BEZ} erst einmal von seinem translatorischen Anteil befreien (in den Ursprung des Bezugskoordinatensystems verschieben), dann von links mit Rot multiplizieren, den translatorischen Anteil wieder zufügen und schließlich auch die Verschiebung Trans von links heranmultiplizieren. Erst durch Zusammenfassung der Sequenz aus Verschiebung in den Ursprung, Rotation und Rückverschiebung zu einer homogenen Matrix Rot^* erhält man wieder einen einfachen Ausdruck:

7. $(T_{WZ}^{\text{BEZ}})_{\text{MOV}} = \text{Trans Rot}^* T_{WZ}^{\text{BEZ}}$
- mit

$$\text{Rot}^* = \begin{bmatrix} 1 & | & p \\ \hline 0 & 0 & 0 & | & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta R & | & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & | & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & | & -p \\ \hline 0 & 0 & 0 & | & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta R & | & -\Delta R p + p \\ \hline 0 & 0 & 0 & | & 1 \end{bmatrix}$$

Betrachtet man translatorischen und rotatorischen Anteil innerhalb der homogenen Matrizen getrennt, kommt man allerdings zu einer effizienteren Rechenvorschrift (die in der ACR bereits implementiert ist).

4.3 Berechnung von Translation und Rotation

Die mit Hilfe homogener Matrizen dargestellten Transformationsvorschriften für die verschiedenen Modi dienen vor allem der analytischen Beschreibung. Für die numerische Implementation ist es sinnvoller, alle Matrizenmultiplikationen vorweg auszuführen. Verschiebung und Drehung können dann mit deutlich weniger Rechenoperationen und getrennt voneinander berechnet werden.

Durch Partitionieren der aktuellen Greifermatrix T_{WZ}^{BEZ} in einen rotatorischen Anteil \underline{R} und einen translatorischen Anteil \underline{p} erhält man:

$$\begin{aligned}
 5 \quad (T_{WZ}^{BEZ})_{BMOV} &= \text{Trans Rot } T_{WZ}^{BEZ} = \begin{bmatrix} \underline{\Delta R} & \underline{\Delta p} \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{R} & \underline{p} \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 10 &= \begin{bmatrix} \underline{\Delta R} \underline{R} & \underline{\Delta R} \underline{p} + \underline{\Delta p} \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 15 \quad (T_{WZ}^{BEZ})_{MOV} &= \text{Trans Rot}^* T_{WZ}^{BEZ} = \begin{bmatrix} \underline{\Delta R} \underline{R} & \underline{p} + \underline{\Delta p} \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 20 \quad (T_{WZ}^{BEZ})_{TMOV} &= \text{Trans } T_{WZ}^{BEZ} \text{ Rot} = \begin{bmatrix} \underline{I} & \underline{\Delta p} \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{R} & \underline{p} \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{\Delta R} & \underline{0} \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 25 &= \begin{bmatrix} \underline{R} \underline{\Delta R} & \underline{p} + \underline{\Delta p} \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 30 \quad (T_{WZ}^{BEZ})_{MOV_TOOL} &= T_{WZ}^{BEZ} \text{ Trans Rot} = \begin{bmatrix} \underline{R} & \underline{p} \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{\Delta R} & \underline{\Delta p} \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 35 &= \begin{bmatrix} \underline{R} \underline{\Delta R} & \underline{R} \underline{\Delta p} + \underline{p} \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Alle Gleichungen liefern ihr Ergebnis im Bezugssystem der am weitesten links stehenden Abbildungsmatrix. Welt-, Roboterfuß- und Basiskoordinaten (\$WORLD, \$ROBROOT, \$BASE) sind gleichermaßen sinnvoll. Die Verwendung des Greiferkoordinatensystems wäre zwar formal korrekt (mit $\underline{R} = \underline{I}$ und $\underline{p} = 0$), würde aber in allen vier Fällen nur noch greiferbezogene Bewegungen zulassen, scheidet hier also aus. Das Ergebnis der Berechnungen liegt somit immer in einem ortsfesten Koordinatensystem vor oder zumindest in in einem Koordinatensystem, dessen Bewegung von vornherein bekannt ist (bei Verwendung von \$BASE mit Zusatzachsen).

Aus Gründen der Einheitlichkeit wurden die Gleichungen bis hierher mit differentiellen Translationen und Rotationen formuliert. Bei einigen Modi kann man jedoch auch mit absoluten Angaben arbeiten, d.h. in jedem Interpolationstakt nicht den Unterschied zum vorhergehenden Takt angeben, sondern den Unterschied zum Beginn der Bewegung. Dies gilt für alle Abbildungsgleichungen, in denen die differentiellen Werte immer in Bezugskoordinaten formuliert sind, d.h. einfach addiert oder von links heranmultipliziert werden.

Demnach kann man in den Modi BMOV und MOV sowohl die Rotation $\underline{\Delta R}$ als auch die Verschiebung $\underline{\Delta p}$ absolut angeben, im Modus TMOV immerhin noch die Verschiebung. Die Variante MOV__TOOL läßt dagegen nur differentielle Operationen zu, da sich das Bezugssystem WZ(\underline{R} , \underline{p}) in jedem Interpolationstakt ändert.

Mathematische Formulierung des greiferbezogenen Handverfahrens

Nach der Formulierung des basisbezogenen Handverfahrens sind bereits alle notwendigen Grundlagen gelegt. Der einzige Unterschied besteht im Wechsel des Blickwinkels: anstelle der Bewegung des Frames WZ relativ zu BEZ gibt man nunmehr BEZ relativ zu WZ an, muß demnach die Gleichungen für die Änderung von einem Interpolationstakt zum nächsten folgendermaßen ansetzen:

1. $(T_{BEZ}^{WZ})_{BMOV} = \text{Trans Rot } T_{BEZ}^{WZ}$ (BMOV greiferbezogen)
2. $(T_{BEZ}^{WZ})_{MOV} = \text{Trans Rot}^* T_{BEZ}^{WZ}$ (MOV greiferbezogen)
3. $(T_{BEZ}^{WZ})_{TMOV} = \text{Trans } T_{BEZ}^{WZ} \text{ Rot}$ (TMOV greiferbezogen)
- 10 4. $(T_{BEZ}^{WZ})_{MOV_TOOL} = T_{BEZ}^{WZ} \text{ Trans Rot}$ (MOV_TOOL greiferbez.)

Der erste Fall (BMOV) ist nur der Vollständigkeit halber aufgeführt, er würde den Ursprung des Greiferkoordinatensystems zum Arbeitspunkt machen, was durch das greiferbezogene Handverfahren gerade vermieden werden soll. Ferner dürfte in der Praxis nur $BEZ = BA$ sinnvoll sein (wie beim basisbezogenen BMOV).

- 15 Der Rechengang bei den anderen Modi deckt sich nahezu mit dem basisbezogenen Handverfahren. Es muß lediglich

1. zu Beginn des Handverfahrens die Startposition T_{BEZ}^{WZ} bereitgestellt werden, d.h., falls gerade auf greiferbezogene Interpolation umgeschaltet wurde, ist $T_{BEZ}^{WZ} = (T_{WZ}^{BEZ})^{-1}$ zu berechnen,
2. die greiferbezogen berechnete neue Position T_{BEZ}^{WZ} in jedem Interpolationstakt in eine basisbezogene Darstellung umgerechnet werden, $T_{WZ}^{BEZ} = (T_{BEZ}^{WZ})^{-1}$.

- 20 Davon abgesehen können die oben abgeleiteten Gleichungen unverändert zum Einsatz kommen. Man erkennt die Verwandtschaft dieser Lösung zur greiferbezogenen Interpolation bei der Programmbearbeitung (Abschnitt 2.2), für die ebenfalls nur Frame-Inversionen bei der Satzaufbereitung (s. auch Abschnitt 7) und nach jedem Interpolationstakt eingeführt werden.

- 25 Man kann die Inversionen natürlich auch vorweg analytisch durchführen, so daß die Gleichungen in basisbezogener Darstellung vorliegen:

1. $(T_{WZ}^{BEZ})_{BMOV} = T_{WZ}^{BEZ} (\text{Rot})^{-1} (\text{Trans})^{-1}$
2. $(T_{WZ}^{BEZ})_{MOV_TOOL} = T_{WZ}^{BEZ} (\text{Rot}^*)^{-1} (\text{Trans})^{-1}$
3. $(T_{WZ}^{BEZ})_{MOV} = (\text{Rot})^{-1} T_{WZ}^{BEZ} (\text{Trans})^{-1}$
- 30 4. $(T_{WZ}^{BEZ})_{TMOV} = (\text{Rot})^{-1} (\text{Trans})^{-1} T_{WZ}^{BEZ}$

Die Inversionen der differentiellen Rotationen und Translationen gestalten sich relativ einfach, da nur die differentiellen Verschiebungen und Verdrehungen (Δx bis ΔC) das Vorzeichen wechseln. Andererseits ist aber auch die Reihenfolge von Rotation und Translation vertauscht, man könnte also nicht die vorhandenen Algorithmen benutzen, sondern müßte neue ableiten und implementieren.

- 35 Zugunsten einer möglichst homogenen Struktur der Steuerung dürfte es daher günstiger sein, die Interpolation greiferbezogen durchzuführen, mit nachfolgender Inversion in jedem Interpolationstakt. Die basisbezogene Darstellung mag lediglich verdeutlichen, daß diese Handverfahr-Modi sich tatsächlich von den bishervorhandenen unterscheiden und daß ein ortsfester Beobachter alle differentiellen Verschiebungen und Verdrehungen mit umgekehrtem Vorzeichen sieht.

40

Transformation in roboterinterne Koordinaten

- Die in Bezugskordinaten berechneten Positionen des Greiferkoordinatensystems (T_{WZ}^{BEZ}) müssen zur Berechnung der Achssollwerte in roboterinterne Koordinaten umgerechnet werden. Da, wie oben dargelegt, 45 die Bewegung des Bezugskordinatensystems als bekannt vorausgesetzt werden kann, erhält man relativ einfache Transformationsvorschriften.

Mit der Abkürzung BEZ für das Bezugskordinatensystem gilt allgemein

$$T_{WZ}^{BEZ} = T_{IRO}^{BEZ} T_{WZ}^{IRO} \Rightarrow T_{IRO}^{WZ} = (T_{IRO}^{BEZ})^{-1} T_{WZ}^{BEZ}$$

50

Die jeweils anzuwendende Transformationsmatrix folgt aus der nachstehenden Tabelle:

55

BEZ	T_{IRO}^{BEZ}	$(T_{IRO}^{BEZ})^{-1}$
\$BASE	$(T_{BA}^{WE})^{-1} T_{RO}^{WE} T_{IRO}^{RO}$	$(T_{RO}^{WE} T_{IRO}^{RO})^{-1} T_{BA}^{WE}$
\$WORLD	$T_{RO}^{WE} T_{IRO}^{RO}$	$(T_{RO}^{WE} T_{IRO}^{RO})^{-1}$
\$ROBROOT	T_{IRO}^{RO}	$(T_{IRO}^{RO})^{-1}$

Erzeugung der Geschwindigkeitsprofile

Der zeitliche Verlauf von Δx , Δy , Δz , ΔA , ΔB und ΔC kann für den neuen Modus BMOV in der gleichen Weise erzeugt werden wie bei den bestehenden Modi. Es ist keine Sonderbehandlung notwendig.

5 Konkret heißt dies, daß für jede Bewegungsrichtung (jede Komponente Δx bis ΔC) ein "Endlosprofil" berechnet wird, das nur aus einer Phase konstanter Geschwindigkeit besteht. Der Geschwindigkeitssprung zu Beginn und Ende der Bewegung wird von der Override-Regelung verschliffen.

Die genannten konstanten Geschwindigkeiten sind durch Maschinendaten vorgegeben und nur für die Komponenten wirksam, deren Verfahrtaasten gedrückt gehalten werden. Alle anderen Komponenten sind
10 Null.

Patentansprüche

1. Robotersteuerung mit einem greiferbezogenen Handverfahren, **dadurch gekennzeichnet**, daß der
15 Drehpunkt bei Orientierungsänderungen immer im Ursprung eines Basiskoordinatensystems liegt.

20

25

30

35

40

45

50

55

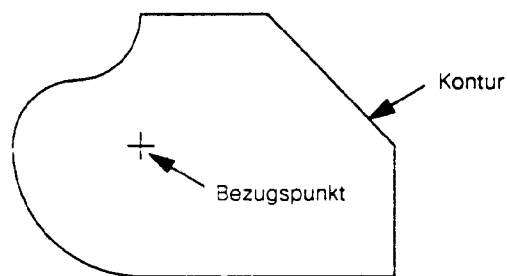


FIG 1

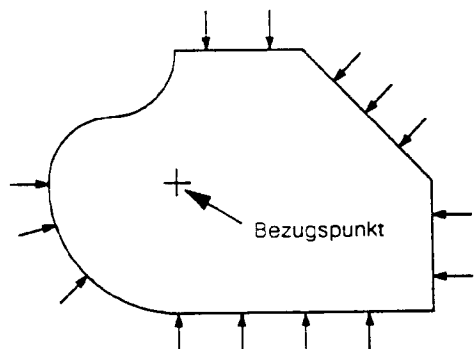


FIG 2

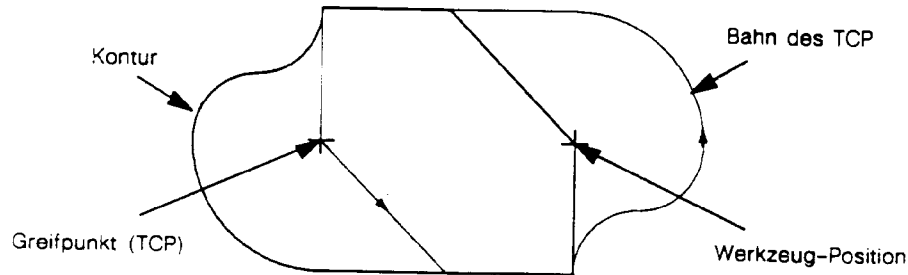


FIG 3

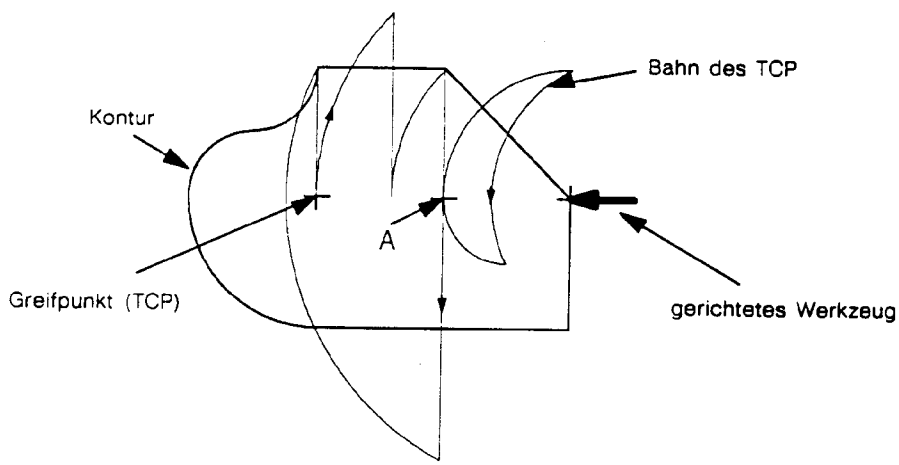


FIG 4

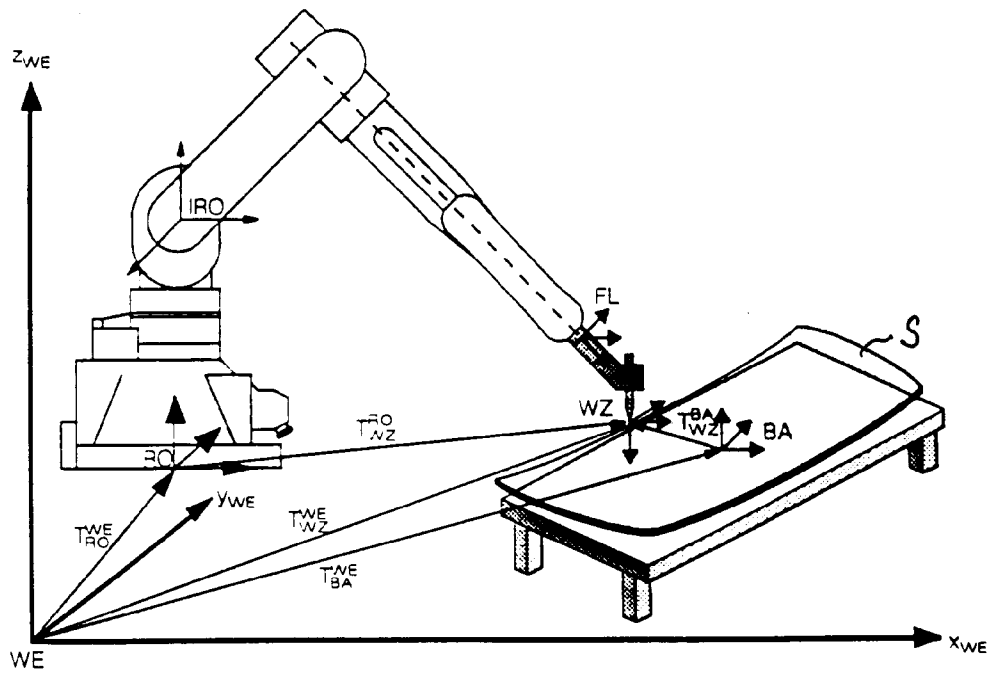


Bild 1: Führung des Werkzeugs über ein ortsfestes Werkstück

FIG 5

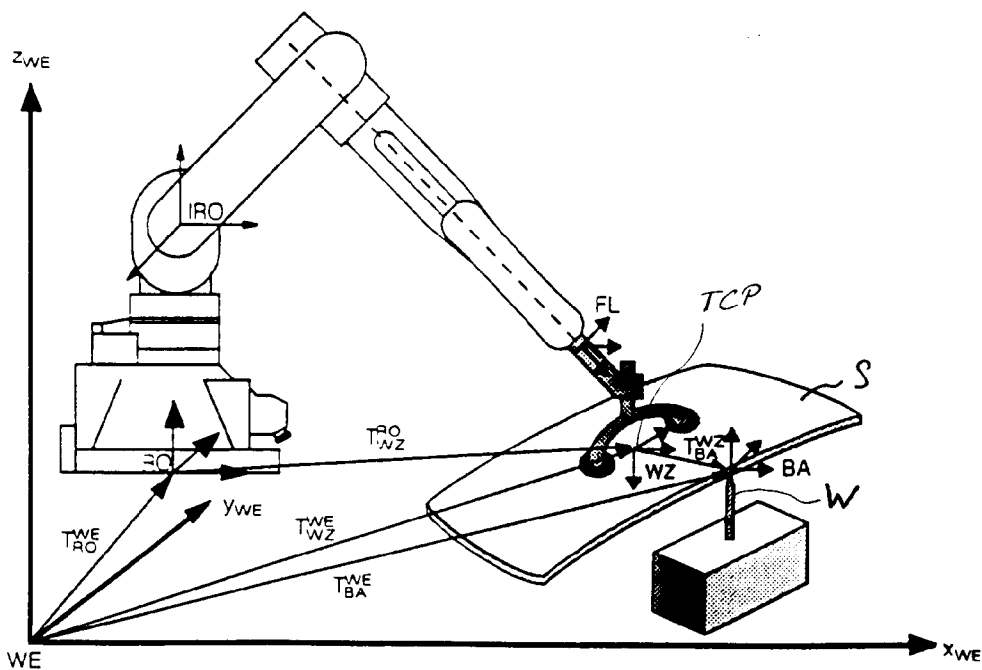


Bild 2: Führung des Werkstücks über ein ortsfestes Werkzeug

FIG 6

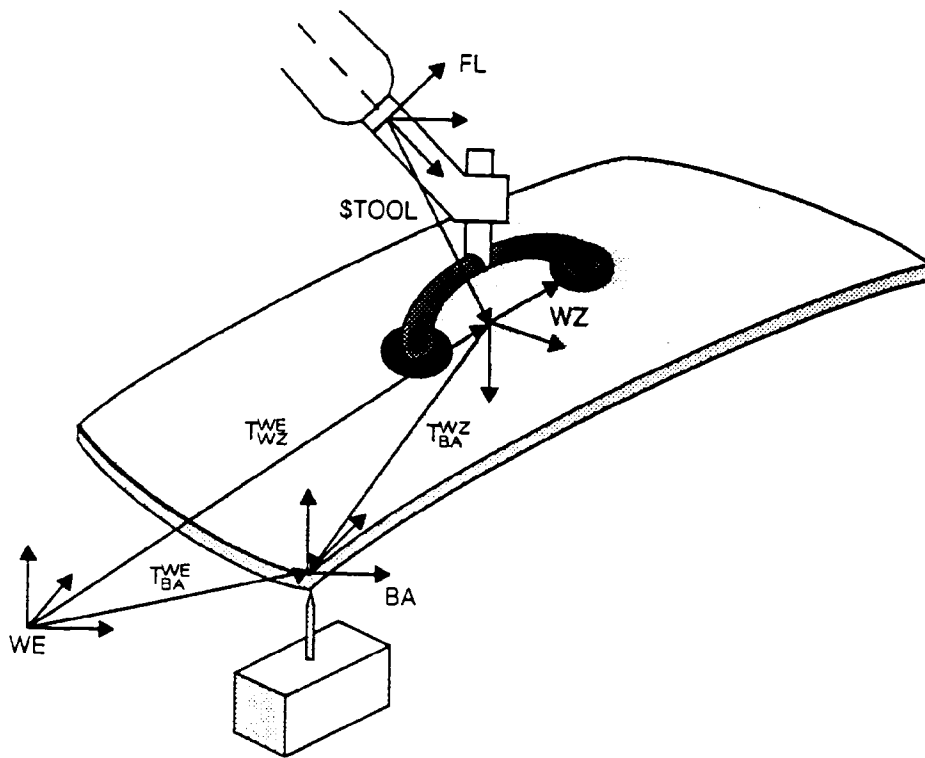


FIG 7

Bild 3: Lernen der Bahn mit geführtem Werkstück

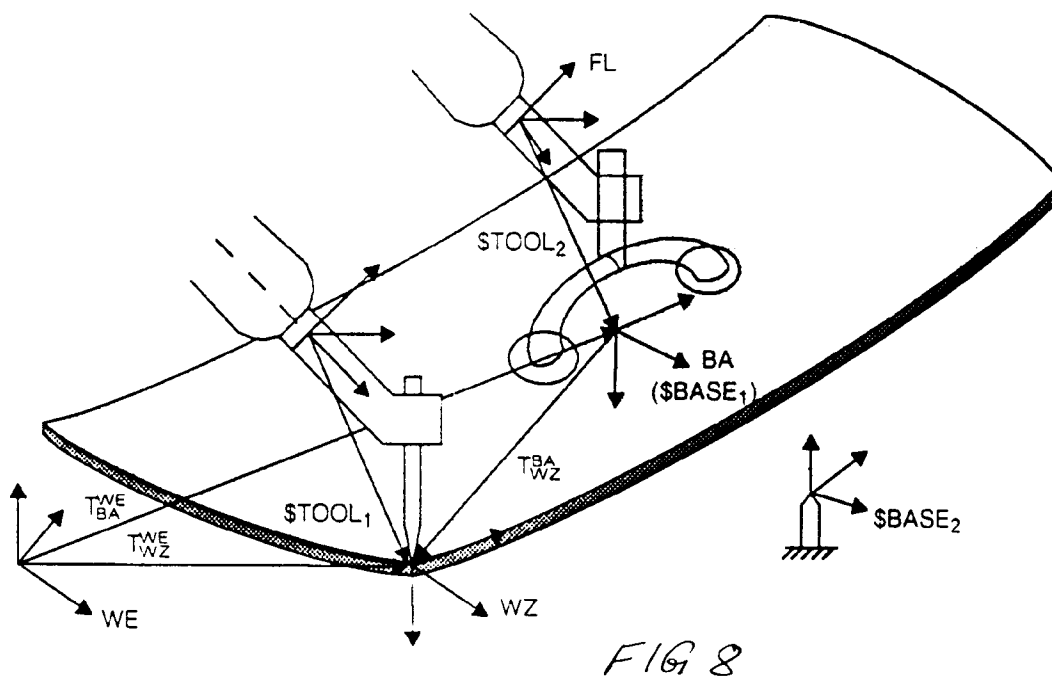


Bild 4: Lernen der Bahn mit fest aufgespanntem Werkstück

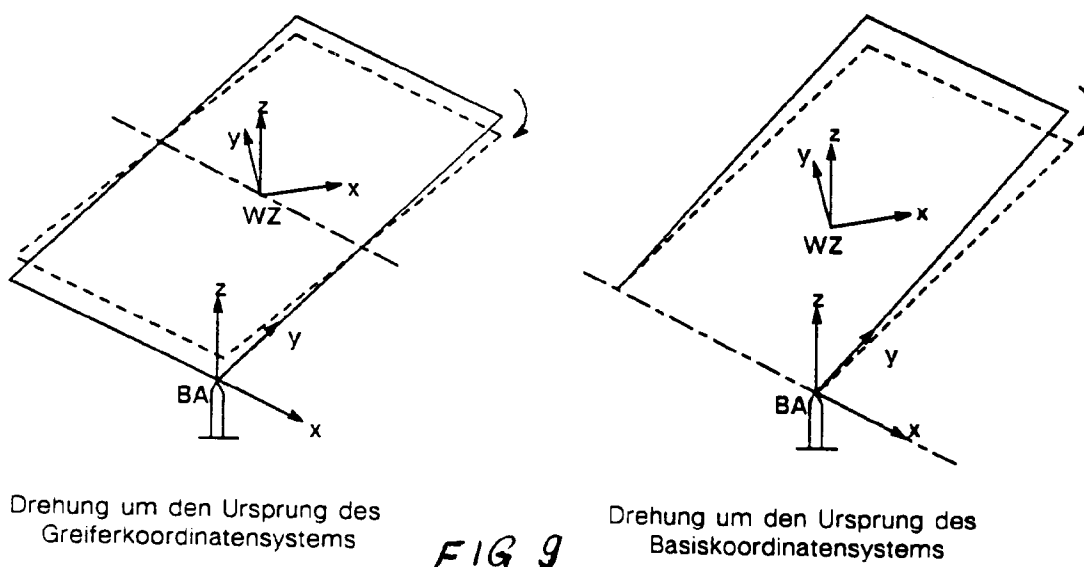


Bild 6: Kartesisches Handverfahren mit Drehungen um die Achsen des Basissystems

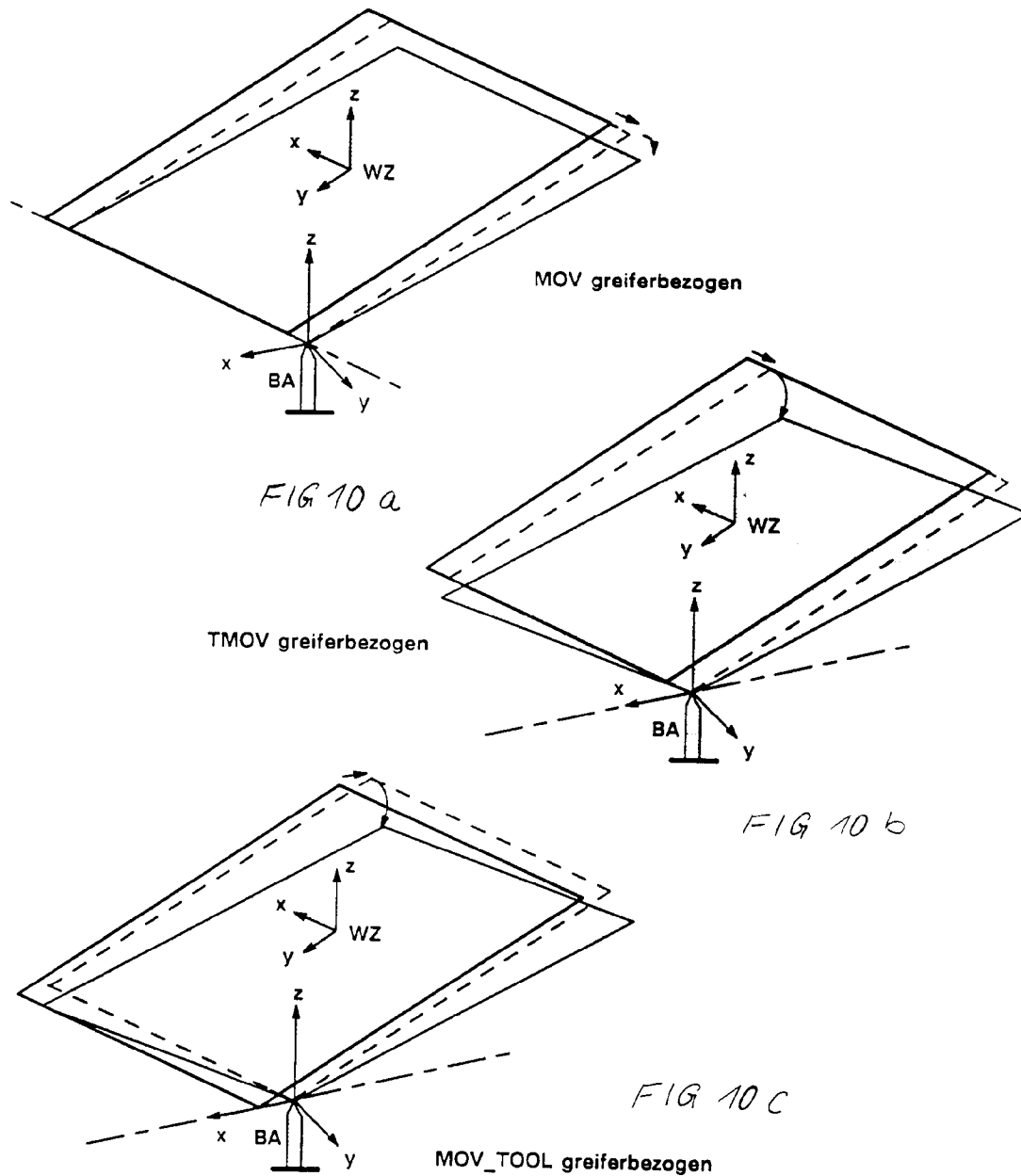


Bild 7: Greiferbezogene Handverfahr-Modi im Vergleich

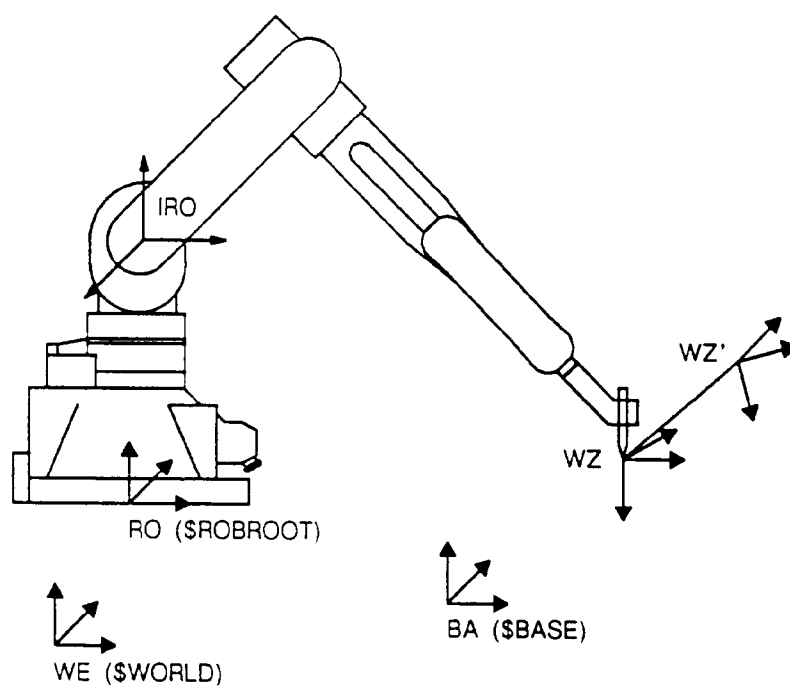


FIG 11

Bild 8: Koordinatensysteme für das kartesische Handverfahren